

**В.В. Бойко, д.т.н., проф.***Інститут гідромеханіки НАН України***В.В. Коробійчук, д.т.н., проф.***Державний університет «Житомирська політехніка»***А.Л. Ган, к.т.н., доц., с.н.с.***КПІ ім. Ігоря Сікорського,**Інститут гідромеханіки НАН України***Т.В. Хлевнюк, к.т.н., с.н.с.***Інституту гідромеханіки НАН України***О.В. Ган, к.т.н.***Інститут гідромеханіки НАН України,**КПІ ім. Ігоря Сікорського*

### **Дослідження безпеки зсувного схилу на ділянці автодороги при ліквідації каменепаду вибуховим методом**

У статті розглядаються питання оцінки безпеки зсувного схилу при проведенні буро-вибухових робіт з ліквідації каменепаду на ділянці автодороги Біловарці – Добрянське – урочище «Облази». Наведено розрахунок інтенсивності сейсмовибухових хвиль і зсувних напружень у ґрунтовому масиві схилу. Показано, що при дотриманні рекомендованих параметрів вибухових робіт стійкість зсувного схилу забезпечується з достатнім запасом міцності.

Проведення буро-вибухових робіт у зонах розвитку зсувних процесів потребує обґрунтування параметрів вибуху з урахуванням їх сейсмічного впливу на ґрунтовий масив, оскільки неконтрольоване динамічне навантаження може призвести до втрати стійкості схилів. на основі аналізу технічної документації буро-вибухових робіт проведено дослідження із застосуванням розрахункових залежностей для визначення масової швидкості зміщення частинок ґрунту та відповідних зсувних напружень у масиві схилу на дослідній ділянці автодороги Біловарці – Добрянське – урочище «Облази». При розрахунках враховано параметри зарядів, умови їх розміщення, напрямки детонації, а також фізико-механічні характеристики ґрунтів. У результаті отриманих залежностей швидкості зміщення частинок ґрунту в охоронному об'єкті та зсувних напружень у суглинках від відстані до ближнього торця розосередженого заряду встановлено, що масова швидкість зміщення частинок ґрунту становить 2,44 см/с на початку схилу, 1,34 см/с у його середині та 0,85 см/с у кінцевій частині, що відповідає зсувним напруженням 0,22; 0,12 та 0,076 кг/см<sup>2</sup> відповідно. Показано, що отримані значення є значно меншими за граничний опір ґрунту на зріз (0,93 кг/см<sup>2</sup>), що забезпечує запас стійкості схилу. Додатково встановлено, що інтенсивність сейсмовибухового впливу є меншою порівняно з нормативною сейсмічністю регіону, яка відповідає 7 балам за шкалою MSK-64. В практичних умовах застосовано дотримання параметрів буро-вибухових робіт та короткосповільненого підривання з напрямком детонації від охоронюваного об'єкта та підтверджено, що вплив вибуху не призводить до розвитку зсувних процесів і не порушує стійкість схилу.

**Ключові слова:** зсувний схил; буро-вибухові роботи; сейсмовибухові хвилі; безпека; зсувні напруження; стійкість схилу; деформації ґрунтового масиву; масова швидкість зміщення.

**Метою досліджень** є визначення впливу сейсмовибухових хвиль на зсувний схил при проведенні буро-вибухових робіт на основі вивчення технічної документації «Технічний проект на проведення буро-вибухових робіт з ліквідації каменепаду на ділянці автодороги Біловарці – Добрянськ – урочище «Облази»» (надалі «Проект») для одержання висновку про інтенсивність впливу сейсмовибухових хвиль на зсувний укіс, розташований на відстані 70 м від крайнього заряду, а також оцінки стійкості цього укосу і можливості безпечного проведення зазначених вибухових робіт (ВР).

Проведення буро-вибухових робіт поблизу зсувонебезпечних ділянок вимагає ретельного обґрунтування параметрів вибухових робіт на основі кількісної оцінки сейсмічного навантаження на схил та критеріїв його стійкості. У «Проекті» та його доповненні розраховані безпечні відстані сейсмічної дії вибуху, однак ці розрахунки не можуть бути основою для оцінки дії ВР на зсувні процеси, оскільки в них не враховуються критерії стійкості зсувного схилу.

**Аналіз сучасних досліджень** у галузі геодинаміки свідчить, що інтенсивність сейсмовибухового впливу на ґрунтовий масив визначається не лише масою заряду, але й умовами його розміщення, режимом підривання та фізико-механічними властивостями середовища. Дослідниками встановлено, що керування

параметрами вибуху дозволяє регулювати швидкість зміщення частинок ґрунту та відповідні напруження у масиві [1–3].

У наукових роботах [1–8] показано, що оптимізація параметрів буро-вибухових робіт, зокрема використання короткосповільненого підривання та раціонального напрямку детонації, забезпечує зменшення сейсмічного навантаження на охоронювані об'єкти та дозволяє уникнути розвитку небезпечних деформацій у ґрунтових масивах.

Разом з тим, питання оцінки впливу вибухових робіт саме на зсувонебезпечні схили в умовах реальних інженерних об'єктів, що зумовлені поєднанням міцних гірських порід у вигляді пісковика та зв'язних м'яких ґрунтів (переважно суглинків) залишається недостатньо дослідженим, що обумовлює значну актуальність цієї роботи.

**Викладення основного матеріалу.** На основі вивчення та аналізу «Проекту» було встановлено наступне. Ліквідацію каменепадку планується провести шляхом висадження навислих «козирків» породи (пісковик глинистий) вибуховим методом горизонтально пробуреними подовженими шпуровими зарядами. Основні характеристики буро-вибухових робіт наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Параметри буро-вибухових робіт

№ п/п	Параметр буро-вибухових робіт	Одиниці виміру	Кількість
1	Діаметр шпурів	м	0,036
2	Місткість 1 м шпуру	кг	0,92
3	Довжина заряду	м	0,53
4	Довжина забивки	м	0,72
5	Маса одного заряду	кг	0,49
6	Відстань між зарядами і рядами	м	1,2
7	Загальна кількість зарядів	шт.	420
8	Застосовувана ВР		амоніт Ф-5-300 амоніт 6ЖВ
9	Ініціювання здійснюється детонуючим шнуром		ДШ-А
10	Кількість ділянок (блоків)	шт.	7
11	Інтервал уповільнення між ділянками	мс	20
12	Кількість зарядів у кожній ділянці (блоці)	шт.	60
13	Маса зарядів у ділянці (блоці)	кг	29,4

Над пісковиком зверху розташований суглинок потужністю від 3 до 4 м. (рис. 1). Всі заряди вибухової речовини (ВР) розміщуються на семи ділянках. Підрив ділянок зарядів має здійснюватися окремо або з використанням коротко-сповільненого підривання (КСП) з інтервалом уповільнення між ділянками 20 мс. Кількість зарядів у кожній ділянці – 60, маса зарядів – 29,4 кг. Напрямок детонації необхідно спрямувати від охоронюваного об'єкта (зсувного схилу): першою вибухає ділянка Е–Ж, а останньою – А–Б (рис. 2).

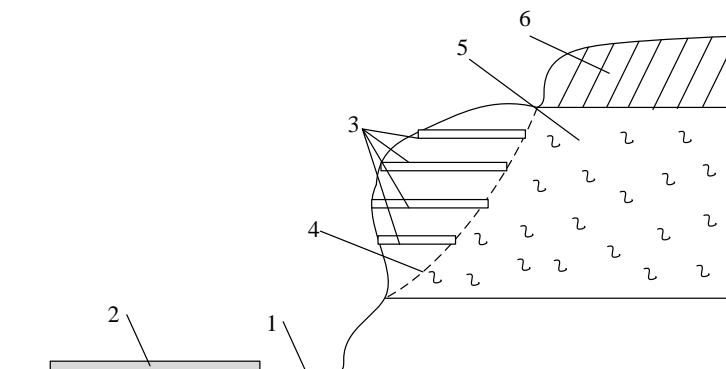


Рис. 1. Схема розташування шпурів у навислих «козирках»: 1 – земляна поверхня, 2 – дорожнє полотно, 3 – шпури, 4 – лінія умовного руйнування «козирка», 5 – пісковик, 6 – суглинок потужністю 3–4 м

Одним із основних об'єктів, що охороняється, у районі проведення вибухових робіт є зсувний схил, розташований уздовж автодороги, до складу якого входять зв'язні м'які ґрунти (переважно суглинки), фізико-механічні характеристики яких наведено у таблиці 2. Відстань від ближнього торця розосередженого заряду до початкової частини зсувного схилу – 70 м, а до його середини – 100 м. Перепад висот – 9 м, довжина в плані – 17,5 м.

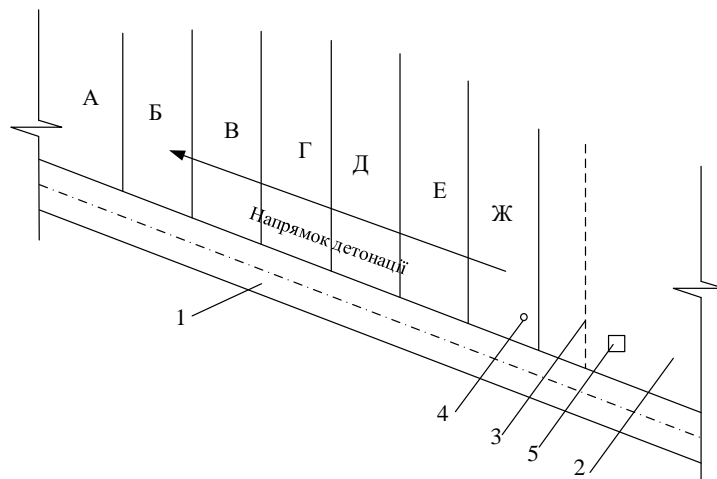


Рис. 2. Схема розташування ділянок (блоків) відносно охоронного об'єкту: 1 – автодорожнє полотно, 2 – охоронний об'єкт, 3 – умовна лінія початкової частини зсувного схилу, 4 – найближчий заряд до зсувного схилу, 5 – пункт спостереження

Таблиця 2

## Фізико-механічні характеристики суглинків

Тип ґрунту	Характеристики				
	Об'ємна вага, $\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	Пористість, $e$	Коефіцієнт зчеплення, $c$ , кг/см <sup>2</sup>	Кут внутрішнього тертя, $\varphi$ , град.	Нормальне стискаюче напруження $\sigma_{ст}$ , кг/см <sup>2</sup>
Суглинок	1,8	0,65	0,28	22	1,62

Критерієм стійкості зв'язних ґрунтів, у тому числі і розглянутого зсувного схилу, є граничний опір на зріз, який визначається на основі закону Кулона. Для нашого випадку отримаємо:

$$\tau = c + \tan \varphi \cdot \sigma_{ст} = 0,28 + 0,4 \cdot 1,62 = 0,93 \text{ кг/см}^2, \quad (1)$$

де  $c$  – коефіцієнт зчеплення, кг/см<sup>2</sup>;  $\varphi$  – кут внутрішнього тертя, град.;  $\sigma_{ст}$  – нормальне стискаюче напруження, кг/см<sup>2</sup>.

Критерієм оцінки впливу сейсмовибухових хвиль на об'єкт, що охороняється, є масова швидкість зміщення частин ґрунту зсуву. На основі цього критерію функціонують формули для визначення сейсмобезпечних відстаней [4].

Для розрахунку масової швидкості зміщення частинок ґрунту зсуву ( $U_R^X$ , см/с) у районі зсувного укосу при вибуху розосередженого заряду застосовується наступна формула [5]:

$$U_R^X = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot N \cdot \left( \frac{r}{Q_{эф}^{1/3}} \right)^{-n}, \quad (2)$$

де  $K_1$  – коефіцієнт ґрунтових умов;  $K_2$  – коефіцієнт циліндричного заряду;  $K_3$  – коефіцієнт, що враховує напрямки детонації зарядів;  $K_4$  – коефіцієнт, що враховує ефект переломлення хвилі в інше середовище;  $N$  – кількість зарядів;  $r$  – відстань від крайнього заряду до об'єкту, що охороняється, м;  $Q_{эф}$  – ефективна маса одного одиночного заряду, кг;  $n$  – показник ступеня затухання інтенсивності хвилі з відстанню.

Зона осередку випромінювання заряду ( $r_n$ ) визначається за формулою:

Визначимо коефіцієнти розрахункової формули (2). Коефіцієнт  $K_1$  враховує властивості ґрунту і пов'язаний з розміром зони вогнища вибуху, визначається за формулою:

$$K_1 = \frac{K_0}{0,05 \cdot (0,4 \cdot K_0 - 1)},$$

де  $K_0$  – коефіцієнт для пісковика у формулі визначення зони осередку вибуху, яка визначається за формулою:

$$r_n = K_0 \cdot \sqrt[3]{Q_1} = 5 \cdot \sqrt[3]{0,49} = 3,94 \text{ м} \quad (3)$$

Для пісковиків відповідний коефіцієнт  $K_0$  дорівнює 5, звідси  $K_1 = 100$ ,  $Q_1$  – маса одного заряду, кг.

Коефіцієнт циліндричності  $K_2$  визначається з урахуванням геометрії шпурового заряду.

$$K_2 = l_{\text{зар}}^{0,15} \cdot P^{0,1} = 0,9.$$

Коефіцієнт  $K_3 = 0,5$  враховує напрямок детонації заряду: детонація повинна бути завжди спрямована у бік, протилежний від охоронюваного об'єкта. В нашому випадку детонацію необхідно починати з ділянки Ж-Е-Д, тощо.

Для визначення коефіцієнта  $K_4$  враховується умова

$$\frac{h_n}{\lambda} \leq 0,05, \quad (4)$$

де  $h_n$  – потужність наносних порід (у даному випадку суглинок 3–4 м),  $\lambda$  – довжина хвилі. Для визначення довжини хвилі, необхідно знати швидкість розповсюдження хвилі  $V_R$  у пісковиках та її період (частоту) коливань. Швидкість розповсюдження хвилі  $V_R$  у пісковиках становить 1550 м/с, а період хвилі ( $T_R$ , с) визначається в середній частині схилу за формулою:

$$T_R = K_T \cdot P_e^{\frac{1}{2}} (0,015 l_{\text{зар}} + 1) \cdot r^{-v} = 0,025 \cdot 0,92^{\frac{1}{2}} (0,015 \cdot 0,53 + 1) \cdot 100^{-0,18} = 0,056 \text{ с (18Гц)},$$

Розрахунок показує, що умова (4) виконується, і тому переломлення хвилі в наносах відбувається, а це значить, що буде відбуватись переломлення хвилі і необхідно враховувати коефіцієнта  $K_4$ . Коефіцієнт переломлення хвилі  $K_4$  визначається з урахуванням акустичних характеристик пісковика та суглинка.

$$\lambda = V_R \cdot T_R = 86 \text{ м}, \quad \frac{h_n}{\lambda} = \frac{9}{86} = 0,1, \quad \frac{h_n}{\lambda} = \frac{4,5}{86} = 0,05.$$

$$K_4 = K_{\text{пр}} = \frac{2\rho_1 \cdot V_{\rho_1}}{\rho_1 \cdot V_{\rho_1} - \rho_2 \cdot V_{\rho_2}} = \frac{2 \cdot 2500 \cdot 3150}{2500 \cdot 3150 - 1800 \cdot 100} = 2,59.$$

Визначимо ефективну масу та оптимальну кількість зарядів. Оскільки охоронний об'єкт знаходиться в напрямку осі розосередженого заряду (у його торці), в утворенні сейсмічного ефекту беруть участь лише ті заряди ( $N$ ), хвилі яких приходять у пункт спостереження (рис. 2) з різницею в часі від попереднього заряду меншою  $\frac{1}{4} T_R$  ( $\frac{1}{4} T_R = 0,014$  с).

Враховуючи швидкість детонації ДШ ( $D_{\text{дш}} = 6000$  м/с), заряди, що знаходяться на відстані  $r = 6000 \times 0,014 = 84$  м від торця заряду, ефективно впливають на інтенсивність сейсмовибухових хвиль, а оскільки довжина кожної ділянки становить 60 м, то усі  $N = 60$  зарядів кожної ділянки (звісно що з різною інтенсивністю у зв'язку зі збільшенням відстані) впливатимуть на зсувний схил. За рахунок короткосповільненого підривання кожної ділянки розрахунок зводиться до миттєвого вибуху зарядів крайньої ділянки відносно зсувного схилу (рис. 2).

Ефект асиметрії сейсмічного впливу розосередженого заряду в цьому випадку не спостерігатиметься, тому розрахунок ведеться на всі 60 зарядів ділянки ( $N = 60$ ). При підриванні ряду зарядів відбувається їхня взаємодія і часткова втрата сейсмічної енергії, тому кожен заряд  $Q_1$  по відношенню залученої енергії до хвильового процесу, характеризується ефективним зарядом:

$$Q_{\text{еф}} = Q_1 \left[ \left( 1 - \frac{1}{m^b} \right) c + \frac{1}{m^b} \right], \quad (5)$$

де  $m$  – кількість зарядів, що взаємодіють у зоні осередку випромінювання заряду  $r_n$ , та визначається за формулою:

$$m = \frac{r_n}{Q} = \frac{3,94}{1,2} = 3,28 \text{ (3 заряди)}$$

$b$  – показник ступеня при кількості взаємодіючих зарядів, який визначається за формулою:

$$b = \frac{3}{n} - 1,$$

де  $n$  – показник затухання сейсмовибухової хвилі, який визначається за формулою в залежності від швидкості розповсюдження поздовжньої хвилі  $V_p$  (км/с):

$$n = 1,3 \cdot (0,1 \cdot V_p + 1).$$

Таким чином показник  $b = 0,76$ . Відносна відстань між зарядами (с) визначається за формулою:

$$c = \frac{Q}{2 \cdot r_n} = \frac{1,2}{7,88} = 0,15.$$

Підставляючи всі розглянуті вище коефіцієнти і значення у формулу (2), отримуємо швидкість зміщення зсуву ґрунту: на початку схилу ( $r = 70$  м) – 2,44 см/с, а в його середині ( $r = 100$  м) – 1,34 см/с та на кінці ( $r = 130$  м) – 0,85 см/с.

На основі результатів розрахунків побудовано залежність швидкості зміщення частинок ґрунту від відстані до найближчого заряду (рис. 3).

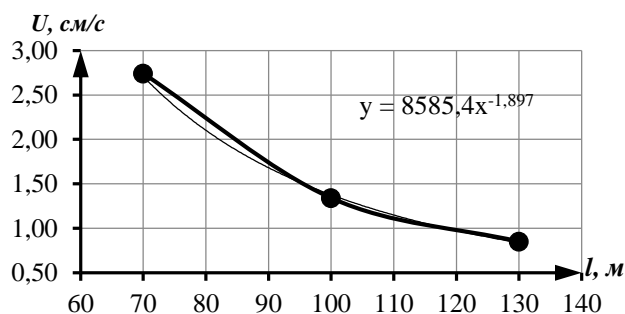


Рис. 3. Швидкість зміщення частинок ґрунту в охоронному об'єкті в залежності від відстані до ближнього торця розосередженого заряду

Сеймовибухові хвилі, що приходять до охоронного об'єкта, створюють зсувні напруження в суглинках, які визначаються за формулою:

$$\tau = \frac{U \cdot \rho \cdot V_p}{2g}, \quad (6)$$

де  $U$  – швидкість зміщення у хвилі, см/с;  $\rho$  – щільність ґрунту, кг/см<sup>3</sup>;  $V_p$  – швидкість поширення поздовжньої хвилі у схилі, см/с;  $g = 980$  см/с<sup>2</sup>.

Підставляючи чисельні значення зазначених параметрів у формулу (6), отримаємо зсувні напруження: на початку зсувного схилу – 0,22 кг/см<sup>2</sup>, в середині – 0,12 кг/см<sup>2</sup>, а в його кінці – 0,076 кг/см<sup>2</sup>. На основі отриманих даних побудовано залежність зсувних напружень суглинку від відстані до найближчого заряду (рис. 4).

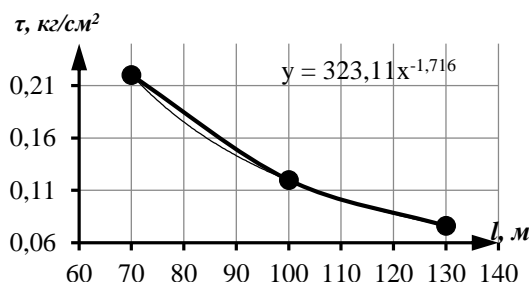


Рис. 4. Зсувні напруження у суглинку залежно від відстані до ближнього торця розосередженого заряду

Порівнюючи значення граничного опору ґрунтів на зріз у зсувному схилі (формула 1), що дорівнює 0,93 кг/см<sup>2</sup>, та зсувних напружень, що виникають внаслідок дії сеймовибухових хвиль (0,22; 0,12 та 0,076 кг/см<sup>2</sup>), можна констатувати достатній запас міцності. Це свідчить про те, що зсувний схил збереже свою стійкість при впливі сеймовибухових хвиль, викликаних миттєвим вибухом шпурових зарядів загальною масою 30 кг на одній ділянці дороги Біловарці – Добрянськ – урочище «Облази».

Порівняємо отримані дані з сейсмічністю регіону. Відповідно до довідкового виданням «Стан техногенної та природної безпеки в Україні» прогнозована можлива інтенсивність при землетрусах для Закарпатської області становить на рівні 7 балів за шкалою MSK-64 (16–32 см/с відповідно до [9]). Порівняно з розрахованими параметрами вибухових робіт (2,44; 1,34 та 0,85 см/с) це значення значно перевищує інтенсивність сейсовибухових хвиль від запроєктованих робіт.

Слід зазначити, що пряме порівняння інтенсивності струсів при вибухах і землетрусах є ускладненим через різні частотні характеристики хвильових процесів. Разом з тим, можна з великою імовірністю стверджувати, що розглянутий зсувний схил при землетрусі інтенсивністю 7 балів зазнає впливу, в кілька разів більшого, ніж від вибухових робіт. Тому рекомендується на випадок виникнення землетрусу укріпити зсувний схил, що з часом втрачає стійкість під впливом природних і техногенних факторів. Крім того, з метою зменшення сейсмічного навантаження на схил необхідно застосувати наступний напрямок детонації зарядів: починати детонацію з ділянки, розташованої найближче до схилу (ділянка Ж–Е–Д), а підрив наступних ділянок зарядів проводити з використанням коротко-сповільненого підривання (КСП) з інтервалом уповільнення 20 мс.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** Порівняння розрахункових результатів інтенсивності сейсовибухової хвилі, зокрема зсувних напружень у середині схилу  $\tau = 0,12$  кг/см<sup>2</sup> та допустимого опору на зріз в масиві ґрунту  $\tau = 0,93$  кг/см<sup>2</sup>, дозволяє зробити висновок про те, що вибух шпурових зарядів загальною масою 30 кг з ліквідації каменепадів на одній ділянці автодороги Біловарці – Добрянське – урочище «Облази» є безпечним стосовно зсувного схилу. Викликані вибуховими роботами напруження у масиві зсувного схилу не можуть спричинити зсувних процесів. Запас міцності зсувного схилу становить від 4 до 8 (залежно від відстані до вибуху), тоді як при проектуванні подібних об'єктів цей коефіцієнт закладається на рівні 1,1–1,5. Однак необхідно враховувати те, що зсувний схил може

знаходиться у перед зсувному стані. Прийнята схема короткосповільненого підривання, при якій детонація здійснюється у напрямку від охоронного об'єкта, забезпечує зменшення сейсмічного впливу на укис. Таким чином, при дотриманні запропонованої схеми та параметрів буро-вибухових робіт, вплив підривання не призводить до виникнення зсувних деформацій і не порушує стійкість схилу.

#### Список використаної літератури:

1. Пат (кор. мод.). № 156136 Україна. МПК (2024.01) G01V 1/00, G01V 1/02 (2006.01), E02D 17/20 (2006.01), № u 202305064. Спосіб оцінки напружено-деформованого стану схилів зсувонебезпечних територій / В.В. Бойко, А.Л. Ган, С.А. Загоруйко та інші ; заяв. 27.10.2023 ; опубл. 15.05.2024, бюл. № 20 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1799393/>.
2. Оцінка напружено-деформованого стану схилів зсувонебезпечних територій на яких розташовані об'єкти критичної інфраструктури / В.В. Бойко, А.Л. Ган, Т.В. Хлевнюк та інші // Збірник наукових праць НГУ. – 2024. – № 77. – С. 7–17. DOI: 10.33271/crpnmu/77.007.
3. Оцінка сейсмостійкості об'єктів критичної інфраструктури з урахуванням їх власної гармоніки у вибуховому спектрі цивільного і воєнного характерів / В.В. Бойко, Ю.І. Войтенко, А.Л. Ган та ін. // Технічна інженерія. – 2024. – № 1 (93). – С. 308–315. DOI: 10.26642/ten-2024-1(93)-308-315.
4. НПАОП О.ОО-1.66-13 Правила безпеки під час поводження з вибуховими матеріалами промислового призначення. – К. : ДП Редакція журналу «Охорона праці», 2013. – 359 с.
5. Технічні правила ведення вибухових робіт на денній поверхні. – Х. : Лідер, 2013. – 120 с.
6. Проведення промислових вибухів. Норми сейсмічної безпеки : ДСТУ 4704:2008 / В.В. Бойко, В.С. Воротеляк, Г.А. Воротеляк та ін. – К. : Держспоживстандарт України, 2009. – 11 с.
7. Бойко В.В. Проблеми сейсмічної безпеки вибухової справи у кар'єрах України : монографія / В.В. Бойко. – К. : ТОВ «Видавництво Сталь», 2012. – 234 с.
8. Кравець В.Г. Фізичні процеси прикладної геодинаміки вибуху : монографія / В.Г. Кравець, В.В. Коробіичук, В.В. Бойко. – Житомир : ЖДТУ, 2015. – 408 с.
9. ДБН В.1.1-12:2025. Будівництво у сейсмічних районах. Основні положення.
10. Вплив сейсмоакустичних хвиль на тріщиноутворення блочних ділянок при супутньому видобуванні гранітів на щєбінь / В.В. Коробіичук, В.В. Бойко, А.Л. Ган та ін. // Науковий вісник ДонНТУ. – 2025. – № 2 (15). – С. 102–117.
11. Сучасні технології вибухових робіт : навч. посібн. / В.В. Коробіичук, І.В. Леонет, В.О. Соколовський, Д.М. Білобров. – Житомир : Рута, 2024. – 300 с.

#### References:

1. Boiko, V.V., Han, A.L., Zahoruiko, Ye.A. et al. (2024), *Sposib otsinky napruzhenodeformovanoho stanu skhyliv zsvovonebezpechnykh terytorii*, Pat (kor. mod.). No. 156136 Ukraina. MPK (2024.01) G01V 1/00, G01V 1/02 (2006.01), E02D 17/20 (2006.01), No. u 202305064, zaiav. 27.10.2023, biul. No 20, [Online], available at: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1799393/>
2. Boiko, V.V., Han, A.L., Khlevniuk, T.V. et al. (2024), «Otsinka napruzhenodeformovanoho stanu skhyliv zsvovonebezpechnykh terytorii na yakykh roztashovani obiekty krytychnoi infrastruktury», *Zbirnyk naukovykh prats NHU*, No. 77, pp. 7–17, doi: 10.33271/crpnmu/77.007.
3. Boiko, V.V., Voitenko, Yu.I., Han, A.L. et al. (2024), «Otsinka seismostiikosti obiektiv krytychnoi infrastruktury z urakhuvanniam yikh vlasnoi harmoniky u vybukhovomu spektri tsyvilnoho i voiennoho kharakteriv», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 1 (93), pp. 308–315, doi: 10.26642/ten-2024-1(93)-308-315.
4. «Pravyla bezpeky pid chas povodzhennia z vybukhovymy materialamy promysloвого pryznachennia : NPAOP O.OO-1.66-13», (2013), DP Redaktsiia zhurnalnu «Okhorona pratsi», K., 359 p.
5. *Tekhnichni pravyla vedennia vybukhovyykh robot na dennii poverkhni* (2013), Lider, Kh., 120 p.
6. Boiko, V.V., Voroteliak, V.Ye., Voroteliak, H.A. et al. (2009), *DSTU 4704:2008 Provedennia promyslovykh vybukhiv. Normy seismichnoi bezpeky*, Derzhspozhyvstandart Ukrainy, K., 11 p.
7. Boiko, V.V. (2012), *Problemy seismichnoi bezpeky vybukhovoї spravy u karierakh Ukrainy*, monohrafiia, TOV «Vydavnytstvo Stal», K., 234 p.
8. Kravets, V.H., Korobiiichuk, V.V. and Boiko, V.V. (2015), *Fizychni protsesy prykladnoi heodynamiky vybukhu*, monohrafiia, ZhDTU, Zhytomyr, 408 p.
9. *DBN V.1.1-12:2025. Budivnytstvo u seismichnykh raionakh. Osnovni polozhennia*.
10. Korobiiichuk, V.V., Boiko, V.V., Han, A.L. et al. (2025), «Vplyv seismoakustychnykh khvyl na trishchynoutvorennia blochnykh dilianok pry suputnomu vydobuvanni hranitiv na shchebin», *Naukovyi visnyk DonNTU*, No. 2 (15), pp. 102–117.
11. Korobiiichuk, V.V., Leonets, I.V., Sokolovskiy, V.O. and Bilobrov, D.M. (2024), *Suchasni tekhnolohii vybukhovyykh robot, navch. posibn.*, Ruta, Zhytomyr, 300 p.

**Бойко** Віктор Вікторович – доктор технічних наук, професор, професор Інституту гідромеханіки НАН України.

<https://orcid.org/0000-0003-3443-1688>.

Наукові інтереси:

- гірнича справа;
- промислова сейсдобезпека вибухів;
- гуманітарне та бойове розмінування;
- сейсдобезпека та захист критичної інфраструктури.

**Коробійчук** Валентин Вацлавович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри гірничих технологій та будівництва ім. проф. Бакка М.Т. Державного університету «Житомирська політехніка»; провідний науковий співробітник Інституту гідромеханіки НАН України.

<https://orcid.org/0000-0002-1576-4025>.

Наукові інтереси:

- гірнича справа;
- промислова сейсмобезпека вибухів;
- видобуток природного каменю.

**Ган** Анатолій Леонідович – кандидат технічних наук, доцент, доцент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; старший науковий співробітник Інституту гідромеханіки НАН України.

<https://orcid.org/0000-0003-0832-1338>.

Наукові інтереси:

- вибухові роботи;
- гірнича справа;
- геоінженерія;
- гуманітарне та бойове розмінування;
- сейсмобезпека та захист критичної інфраструктури.

**Хлевнюк** Тамара Вікторівна – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту гідромеханіки НАН України.

<https://orcid.org/0000-0001-8024-1864>.

Наукові інтереси:

- підвищення надійності оцінки сейсмобезпеки будівель та споруд при проведенні короткосповільнених масових вибухів на кар'єрах.

**Ган** Олена Валеріївна – старший викладач Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; старший науковий співробітник Інституту гідромеханіки НАН України.

<https://orcid.org/0000-0003-0739-9600>.

Наукові інтереси:

- захист навколишнього середовища;
- геоінженерія;
- вибухова справа;
- гуманітарне розмінування;
- захист критичної інфраструктури.

**Boiko V.V., Korobiichuk V.V., Han A.L., Khlevniuk T.V., Han O.V.**

#### **Study of landslide slope safety on a road section during rockfall removal by blasting**

The paper examines the assessment of landslide slope safety during drilling and blasting operations aimed at eliminating rockfall along the Bilovartsi – Dobrianske – «Oblazy» road section. A calculation of the intensity of seismic blast waves and shear stresses in the soil mass of the slope is presented. It is shown that, when the recommended blasting parameters are followed, the stability of the landslide slope is ensured with a sufficient safety margin.

Carrying out drilling and blasting operations in areas prone to landslide processes requires substantiation of blasting parameters with consideration of their seismic impact on the soil mass, since uncontrolled dynamic loading may lead to slope instability. Based on the analysis of technical documentation of drilling and blasting operations, a study was conducted using analytical relationships to determine the particle velocity of soil displacement and the corresponding shear stresses in the slope mass at the experimental section of the Bilovartsi – Dobrianske – «Oblazy» road. The calculations take into account charge parameters, placement conditions, detonation direction, and the physical and mechanical properties of soils.

As a result of the obtained relationships between soil particle velocity in the protected object and shear stresses in loams versus the distance to the nearest end of a distributed charge, it was established that the particle velocity amounts to 2.44 cm/s at the beginning of the slope, 1.34 cm/s in the middle part, and 0.85 cm/s in the final section, corresponding to shear stresses of 0.22, 0.12, and 0.076 kg/cm<sup>2</sup>, respectively. It is shown that these values are significantly lower than the ultimate shear strength of the soil (0.93 kg/cm<sup>2</sup>), which ensures a safety margin for slope stability.

Additionally, it was established that the intensity of the seismic blast impact is lower than the normative seismicity of the region, which corresponds to 7 points on the MSK-64 scale. Under practical conditions, compliance with the parameters of drilling and blasting operations and the use of short-delay blasting with detonation directed away from the protected object were ensured, confirming that the blast impact does not lead to the development of landslide processes and does not compromise slope stability.

**Keywords:** landslide slope; drilling and blasting operations; seismic blast waves; safety; shear stresses; slope stability; soil mass deformation; particle velocity.

Стаття надійшла до редакції 19.12.2025.